

СЕМЕНОВА ЛЮДМИЛА АНАТОЛЬЕВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО РАЗВИТИЮ  
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
ТЕХНОЦЕНОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА  
И ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и  
электроэнергетические системы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «УГТУ – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на кафедре «Теоретическая электротехника и технологии электроснабжения»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
**Бердин Александр Сергеевич**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
**Обоскалов Владислав Петрович**

кандидат технических наук  
**Комлев Юрий Михайлович**

Ведущая организация:

ОАО «Екатеринбургская  
электросетевая компания»  
(г. Екатеринбург)

Защита состоится 23 июня 2010 года, в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 при ГОУ ВПО «УГТУ – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э-406.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.285.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УГТУ-УПИ. Факс (343) 359-16-15; e-mail: l\_sem@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «УГТУ – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.285.03,  
доктор технических наук

\_\_\_\_\_ Зюзев А. М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современные условия характеризуются возрастанием сложности процессов, происходящих в социально-экономических, организационно-технических системах, в том числе и в электроэнергетике, что приводит к изменению и усложнению условий функционирования и управления электроэнергетическими системами. Учет изменяющихся условий функционирования таких систем и возрастающих требований к ним, приводят к актуальности принятия решений по развитию систем электроснабжения (СЭС) в современных условиях с учетом ряда неопределенностей.

Система электроснабжения – динамично развивающаяся система. Для нее характерен непрерывный рост нагрузок, обусловленный появлением новых потребителей, увеличением степени электрификации, повышением требований к социально-культурному уровню жизни и другими факторами. Это приводит к необходимости выработки нескольких альтернатив (вариантов) и выбору наилучшего решения по ее развитию и функционированию. В качестве основного (доминирующего) критерия при выборе вариантов развития системы электроснабжения до последнего времени использовался критерий минимума приведенных затрат. В сегодняшних условиях ввиду многообразия субъектов отношений (энергокомпаний, инвесторы, потребители, органы власти и т.д.) и их интересов, требуется полный учет и согласование мнений заинтересованных сторон в выборе наилучшего варианта развития и функционирования СЭС с учетом экономических, технических, социальных, экологических и других критериев. Кроме того, выбор решений по развитию СЭС осложняется неопределенностью ситуаций, когда полностью или частично отсутствует информация о возможных состояниях системы и/или внешней среды.

Применяемые математические методы, основанные на детерминированном или стохастическом описании подобных задач, их анализ и выработка на этой основе механизма управления и принятия решения в современных изменяющихся условиях, не обеспечивают требуемую достоверность и точность. Так как СЭС является сложной технической системой, для которой характерны множество целей функционирования и неопределенность части исходной информации, то принятие решения по ее развитию и оптимизации технологических параметров, соответствующих выбранному решению, должно основываться на многокритериальной модели с учетом неопределенных факторов, которые необходимо выявить, исследовать и реализовать в разработке математической модели функционирования СЭС (Л. Л. Богатырев, Н. И. Воропай, Т. Б. Лещинская и др.). В работах Л. Заде, Е. Мамдани, В. Д. Ариона, А. Н. Борисова, Н. Г. Ярушкиной, отмечено, что если в задачах принятия решения присутствует неопределенность, то для их решения целесообразно применять методы теории нечетких множеств.

Проведенный сравнительный анализ методов оптимизации системы электроснабжения показал, что принятие решений по ее развитию, основанных на теории нечетких множеств, не учитывают ценологических свойств и ограничений (ограничений самоорганизации) сложных систем, что приводит к не всегда рациональному выбору. Это связано с тем, что СЭС образует сложную техническую систему – техноценоз (ТЦ), структура которого характеризуется наличием разных (сильных, средних и большого числа преимущественно слабых) связей между объектами, а также определенными закономерностями в соотношении крупных и мелких, часто встречающихся и уникальных объектов.

В настоящее время, применение техноценологического подхода (ТЦП) в электроэнергетике, разработанного учеными научной школы профессора Б. И. Кудрина, способствует решению следующих практических задач: оптимизации структуры техноценозов (В. И. Гнатюк); исследования динамики показателей и структуры техноценозов (В. В. Фуфаев); прогнозирования параметров техноценозов (О. Е. Лагуткин, М. Г. Ошуров); анализа закономерности параметров разнообразия ценозов (Б. В. Жилин). В то же время автору неизвестны работы, посвященные применению ТЦП в задачах принятия решений по развитию СЭС.

Таким образом, проведенный анализ научно-технической литературы и научных публикаций выявил, что вопросы методики принятия решения по развитию СЭС по многокритериальной модели на основе интеграции техноценологического подхода с теорией нечетких множеств не рассматривались, что обуславливает актуальность темы исследования.

**Цель работы.** Разработка и программная реализация методики принятия решения по развитию систем электроснабжения по многокритериальной модели в условиях неопределенности части исходных данных на основе интеграции техноценологического подхода и теории нечетких множеств на примере СЭС района города.

В соответствии с целью сформулированы **задачи исследования**:

1. Выполнить анализ существующих методов решения задач оптимизации СЭС.
2. Исследовать СЭС и потребителей электроэнергии района города на основе техноценологического подхода.
3. Выбрать и обосновать альтернативы развития системы электроснабжения района города и частные критерии их оценки в зависимости от типа СЭС.
4. Разработать новые математические модели частных критериев принятия решения.
5. Реализовать математический аппарат теории нечетких множеств для проведения параметрической оптимизации СЭС района города.

6. Обосновать и предложить новую методику принятия решения по развитию СЭС районов города, интеграцией техноценологического подхода и теории нечетких множеств.

7. Разработать функциональную схему, алгоритм, комплекс программного обеспечения по предложенной методике и выполнить его тестирование.

**Методология исследований**, представленных в диссертационной работе, основывается на системном и техноценологическом подходах к исследованию сложных технических систем, теории принятия решений, теории нечетких множеств, методах экспертного оценивания.

***Научная новизна работы.***

1. Разработана новая методика принятия решения по развитию СЭС района города, интегрирующая техноценологический подход и теорию нечетких множеств.

2. На основе техноценологического подхода к исследованию СЭС района города предложен и обоснован новый частный критерий – критерий построения оптимальной структуры.

3. Разработаны для возможных альтернатив развития СЭС района города математические модели частных критериев: дисконтированных затрат, потерь электроэнергии, недоотпуска электроэнергии потребителям, протяженности трасс кабельных линий, построения оптимальной структуры.

4. Программно реализована методика принятия решения по развитию СЭС на основе разработанных моделей частных критериев и математического аппарата обработок экспертных оценок и нечетких множеств.

**Достоверность** разработанной методики, полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием математического аппарата, работоспособностью программы, реализующей предложенную методику выбора стратегии развития СЭС и тестированием программного комплекса в среде MathCad.

**Практическая значимость работы.** Разработанные в диссертации теоретические положения, методические подходы и модели частных критериев принятия решения реализованы в программном комплексе «ПК ЭСМОС», позволяют осуществить обоснованный выбор варианта развития и номенклатурных параметров СЭС района города по многокритериальной модели с учетом неопределенности прогнозируемых (перспективных) электрических нагрузок. Разработанный программный комплекс и его компоненты зарегистрированы в Университетском фонде алгоритмов и программ ГОУ ОГУ № 437, 2009, г. Оренбург и в Федеральном институте промышленной собственности (Роспатент) № 2009615732, 2009, г. Москва.

Полученные результаты могут применяться: в компьютерных системах поддержки принятия управленческих решений в электроэнергетике, при проектировании СЭС и формировании соответствующих нормативных документов.

**Реализация результатов работы.** Разработанная в диссертационном исследовании методика принятия решения по развитию СЭС района города в условиях неопределенности исходных данных, а также полученные результаты и сформулированные предложения по их применению:

- реализованы в НИР «Разработка и внедрение математического и программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем», № госрегистрации 01960005784, инвен. № 02201001067 от 19.03.10;

- апробированы на стадии технической реализации и тестирования в Экспериментально-производственном комбинате (ЭПК) – УГТУ-УПИ;

- компоненты программного комплекса внедрены в Учебном центре «Энергетик – Оренбург» для обеспечения курсов повышения квалификации и переподготовки специалистов в области электроэнергетики;

- внедрены в учебный процесс ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на кафедре «Теоретическая электротехника и технологии электроснабжения».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации и отдельные разделы докладывались и обсуждались на научно-технических и научно-практических конференциях Международного и Всероссийского уровня: «Современные информационные технологии в науке, образовании и практике» (Оренбург, 2006, 2008, 2009); «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы» (Оренбург, 2007); «XIV отчетная конференция молодых ученых УГТУ – УПИ» (Екатеринбург, 2008); «Энергосистема: управление, конкуренция, образование» (Екатеринбург, 2008); «Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий» (Уфа, 2009); «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2009); «Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений» (Москва, 2009); «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2009).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе две статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ. Получены два свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Весь материал работы изложен на 187 страницах, включает 20 рисунков, 27 таблиц и 2 приложения. Список использованной литературы состоит из 195 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и задачи исследования, определяется методика исследования, указывается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура и объем диссертационной работы.

*В первой главе* «Анализ методов решения задач оптимизации развития СЭС» выполнен анализ предметной области исследования; рассмотрена применимость ценологического подхода для решения задач в электроэнергетике; рассмотрены методы принятия решений в условиях неопределенности части исходной информации; выполнен сравнительный анализ методов оптимизации развития систем электроснабжения. Дана характеристика СЭС как сложной системы. Показано, что такие особенности СЭС, как наличие большого числа элементов, динамизм развития, многовариантность и многокритериальность развития, а также неопределенность части исходных данных порождают серьезные трудности в поиске (принятии) обоснованных решений по вариантам развития и параметрам СЭС.

Одним из условий управления развитием сложных систем является их оптимизация, рассматривать которую можно, с одной стороны, как процесс нахождения экстремума целевой функции (например, при оптимизации режимов по активной мощности), а с другой – как выбор наилучшего (оптимального) варианта развития из множества возможных. В данной работе оптимизация рассматривается как поиск наилучшего варианта развития из некоторого множества допустимых.

Проведенный автором анализ научно-технической литературы, показал, что в настоящее время техноценологический подход в электроэнергетике применяется для: анализа и оптимизации структуры систем электроэнергетики и отраслей промышленности России; изучения разнообразия электрических аппаратов, электрических машин в СЭС предприятий с целью организации и управления электроремонтом; анализа потребления ресурсов структурными подразделениями предприятий, энергоисточниками потребителей и прогнозирования параметров электропотребления (Б. И. Кудрин, В. И. Гнатюк, Б. В. Жилин, Е. З. Зайцев, О. Е. Лагуткин, А. А. Морланг, М. Г. Ошуров, В. В. Фуфаев и др.). В то же время автору неизвестны работы по применению ТЦП в вопросах оптимизации системы электроснабжения города (или отдельного ее района) в контексте принятия решения по выбору варианта ее развития.

Выявлено, что усложнение задач оптимизации систем электроснабжения требует соответствующего развития средств и процедур обоснования принятия решений по их развитию на основе многокритериального анализа возможных

альтернатив с учетом неопределенности части исходной информации. В такой постановке задачи наиболее приемлемым представляется использование подхода, основанного на теориях принятия решений и нечетких множеств. Однако, несмотря на многочисленность работ в данной области (В. Д. Арион, Л. Л. Богатырев, Н. И. Воропай, П. Е. Мезенцев, А. А. Метельков, Т. Б. Лещинская, Г. В. Шведов и др.) еще недостаточно проработаны аспекты по применению этого подхода в вопросах анализа энергосистем и решения задач их развития, в том числе в алгоритмах выбора варианта развития СЭС района города.

Сравнительный анализ методов оптимизации системы электроснабжения показал, что выбор варианта развития, основанный на детерминированном, стохастическом подходах и с применением теории нечетких множеств не учитывает ценологических свойств и ограничений сложных систем. Это приводит к не всегда обоснованному принятию решения по развитию СЭС. Необходимость учета ценологических свойств обусловлена математически определенными количественными соотношениями между крупным, средним и мелким, или между уникальным (единичным) и стандартизованным (массовым).

Таким образом, предполагается, что выявленные недостатки разработанных в настоящее время методов и методик выбора варианта развития СЭС могут быть устранены путем реализации процесса принятия решения на основе интеграции техноценологического подхода и теории нечетких множеств.

**Во второй главе** «Техноценологический подход к исследованию СЭС района города» эмпирически и аналитически обоснована принадлежность СЭС района г. Екатеринбурга, эксплуатируемая ЭПК УГТУ-УПИ (далее район «УПИ») к системам техноценологического типа; выделены этапы и процедуры исследования техноценоза; выполнен прогноз роста электропотребления и определен диапазон прогнозных коэффициентов роста нагрузки –  $K_{рн}$ ; предложена классификация типов СЭС районов города (РГ) в зависимости от  $K_{рн}$ .

Эмпирическое обоснование принадлежности СЭС РГ к техноценозу осуществлено по следующим восьми показателям: 1) границы; 2) количество элементов; 3) тип связей; 4) система параметров; 5) неповторимость; 6) жизненный цикл; 7) динамика развития; 8) математический аппарат исследования.

Рассмотрено применение техноценологического подхода к исследованию района «УПИ» г. Екатеринбурга, включающего 165 слабосвязанных объектов с суммарным годовым электропотреблением от нескольких тысяч до миллионов кВт·ч, с предысторией 4 года.

С учетом поставленных в работе задач, предложена методика анализа и обработки данных объектов техноценоза, реализованная в два этапа, включающих в себя следующие процедуры:



## I. Информационный этап:

1.1 выделение системы-техноценоза;

1.2 описание техноценоза и формирование базы данных.

## II. Аналитический этап:

2.1 построение табулированного рангового распределения;

2.2 графическое построение ранговых распределений (ранговых по параметру, ранговидовых, видовых);

2.3 аппроксимация ранговых распределений;

2.4 проверка соответствия данных критериям  $H$ -распределения.

В рамках первой процедуры первого этапа выполняются следующие действия: ценоз выделяется в пространстве и времени как некоторая система (целостность); из ценоза выделяется семейство элементарных объектов (особей), далее неделимых; вводится понятие вид и выбираются параметры исследования, характеризующие лишь какую-то часть реального ценоза.

В работе выделены семейства потребителей электрической энергии района «УПИ» г. Екатеринбурга и электротехнического оборудования (в частности, трансформаторов, установленных на трансформаторных подстанциях 6/0,4 кВ). Параметрами исследования выбраны: месячное электропотребление и установленная мощность трансформатора, соответственно. Понятие «вид» введено только для семейства трансформаторов, поскольку для непрерывной величины потребления электроэнергии оно не имеет большой информативной нагрузки. За вид принят трансформатор мощностью  $S$ , кВА.

ТЦП предусматривает наличие базы данных. По специально разработанным формам осуществлен сбор данных обо всех потребителях электроэнергии с историей на глубину 4-х лет, а также данных по установленному электротехническому оборудованию. Это позволило получить развернутую картину электропотребления и структуры существующей СЭС района «УПИ» г. Екатеринбурга и создать электронную базу данных для дальнейшего анализа. База предполагает обновление исходных данных о потребителях электроэнергии, об изменениях в структуре системы электроснабжения, что позволяет анализировать процесс энергопотребления в реальном масштабе времени, а также использовать имеющуюся информацию при его прогнозировании и выборе дальнейшего варианта развития СЭС.

На основе созданной базы данных в работе осуществлено построение табулированных ранговых распределений по годам, которые представляют собой таблицы, составленные в результате процедуры ранжирования объектов техноценоза по параметрам электропотребления объектов и параметрам установленного электротехнического оборудования.

Полученные табулированные распределения по рассмотренным параметрам представляют собой совокупность точек, получаемых по эмпирическим данным:

$$(r_1, W_1); (r_2, W_2); \dots; (r_i, W_i); \dots; (r_n, W_n), \quad (1)$$

где  $i$  – формальный индекс объекта;  $n$  – общее количество объектов;  $W_i$  – значение параметра  $i$ -го объекта;  $r_i$  – ранг  $i$ -го объекта.

На основе полученных табулированных ранговых распределений построены графики: параметрических распределений, как для объектов электропотребления, так и для электротехнического оборудования, и ранговидовых (только для оборудования).

По результатам ранжирования осуществлена аппроксимация, которая заключается в подборе аналитической зависимости, наилучшим образом описывающей совокупность точек выражения (1). С этой целью дискретный набор точек  $(r_i, W_i)$  аппроксимируется невозрастающей гиперболической зависимостью:

$$W(r) = \frac{W_1}{r^\beta}, \quad (2)$$

где  $W(r)$  – ранжированные значения параметра (объекты (элементы) расположены в порядке уменьшения значения параметра);  $r$  – целочисленное значение ранга (ранг – номер по порядку при расположении объектов в порядке уменьшения параметра);  $W_1$  – константа, равная значению наиболее крупного объекта;  $\beta$  – характеристический ранговый показатель, определяющий степень крутизны кривой.

Совокупность полученных ранговых распределений по параметру электропотребления задает ранговую поверхность  $H$ -распределения, представленную на рисунке 1, используемую для дальнейшего прогнозирования и определения коэффициента роста нагрузки.

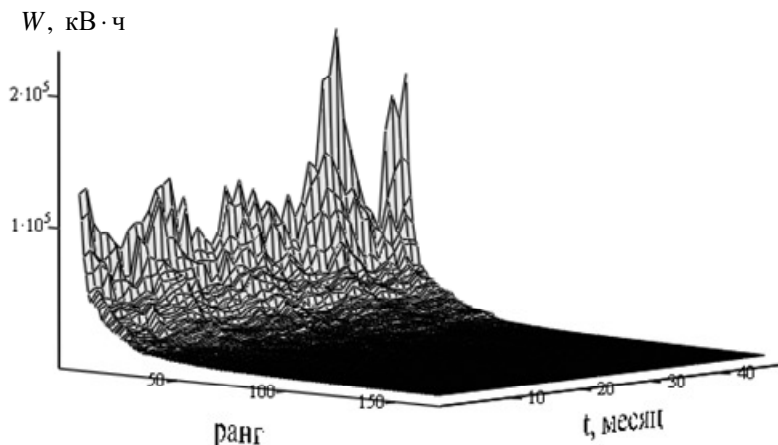


Рисунок 1 – Ранговая поверхность  $H$ -распределения объектов по электропотреблению.

Аналитическое доказательство того, что полученные распределения относятся к классу негауссовых распределений, проводилось с использованием математического аппарата теории вероятности. Проверка заключалась в совместном выполнении двух гипотез:

1) несоответствие генеральной совокупности данных о потребителях электроэнергии, а также данных по установленному электротехническому оборудованию нормальному распределению по критерию Пирсона:

$$\chi_{набл}^2 = \sum \frac{(n_i - n'_i)^2}{n'_i}, \quad (3)$$

где  $n_i$ ,  $n'_i$  – эмпирические и теоретические частоты соответственно.

2) значима ли взаимосвязь данных, определяемая с помощью коэффициента конкордации:

$$W = \frac{12 \cdot \sum D}{m^2 \cdot (n^3 - n)}, \quad (4)$$

где  $D$  – отклонение суммы рангов объекта от их средней суммы для  $n$  объектов;  $m$  – количество временных точек траектории движения показателя.

На основании того, что для всех построенных в работе распределений получено:  $\chi_{набл}^2 > \chi_{кр}^2$  и коэффициент конкордации значим и находится в пределах  $0,5 \leq W \leq 1$ , сделан вывод, что исследуемая система электроснабжения района города относится к техноценозу.

Прогнозирование и определение коэффициента роста нагрузки выполнено на основе известной синтетической методологии. На рисунке 2 приведена структура прогнозной базы данных техноценоза по электропотреблению.

Ранг	Электропотребление объектов по годам					
	$t - k$	...	$t - 2$	$t - 1$	$t$	$t + 1$
1	$W_{1k}$	...	$W_{12}$	$W_{11}$	$W_{10}$	?
2	$W_{2k}$	...	$W_{22}$	$W_{21}$	$W_{20}$	?
...	...	...	Матрица данных		...	...
$n-1$	$W_{(n-1)k}$	...			$W_{(n-1)0}$	?
$n$	$W_{nk}$	...	$W_{n2}$	$W_{n1}$	$W_{n0}$	?

Вектор прогнозирования

Вектор верификации

Рисунок 2 – Структура прогнозной базы данных по электропотреблению:

$W_{nk}$  – электропотребление  $n$ -го объекта в  $(t - k)$ -ом году, кВт·ч.

Прогноз электропотребления в работе осуществлен на основе интерполяции основных параметров гиперболической формы:

$$W = \int_0^{\infty} \frac{W_{0np}}{r^{\beta_{np}}} dr, \quad (5)$$

где  $W_{0np}$ ,  $\beta_{np}$  – прогнозные параметры распределения, определяемые на основе временных рядов либо вторичного рангового анализа.

Полученные прогнозные параметры позволили рассчитать коэффициент роста/спада нагрузки:

$$K_{pn} = \frac{W_{t+h}}{W_t}, \quad (6)$$

где  $W_{t+h}$  – прогнозное значение электропотребления в  $(t+h)$  году;  $h$  – горизонт прогнозирования;  $W_t$  – фактическое электропотребление в  $t$ -ом году.

В зависимости от численных значений прогнозных коэффициентов роста нагрузки, определенных с помощью  $H$ -распределений, предложено классифицировать СЭС районов города по следующим основным типам: строящиеся; развивающиеся (и/или стабильно функционирующие); угасающие. Результаты прогнозирования изменения электропотребления, осуществленные посредством выполнения процедур информационного и аналитического этапов позволили отнести исследуемую СЭС района «УПИ» г. Екатеринбурга к развивающемуся (стабильно функционирующему) типу.

**В третьей главе** «Структурная и номенклатурно-параметрическая оптимизация СЭС района города» рассмотрены: обоснование стратегий развития в зависимости от типа СЭС района города; методики обработок экспертных оценок; приведены общие требования, предъявляемые как к отдельным критериям, так и к системе частных критериев принятия решения; осуществлен выбор и обоснование системы частных критериев, влияющих на выбор стратегии развития СЭС РГ; на основе топологической модели СЭС района города получены аналитические выражения частных критериев принятия решения, как функции неопределенного внешнего фактора – коэффициента роста нагрузки и альтернативы; определены численные значения функции принадлежности электрической нагрузки и частных критериев; представлен математический аппарат нечетких множеств в выборе номенклатурных параметров стратегии развития СЭС района города.

В соответствии с предложенной классификацией систем электроснабжения районов города, в таблице 1 представлены гипотетические варианты стратегий развития СЭС.

По результатам обработки экспертных оценок посредством программной реализации методов непосредственной оценки, парных сравнений и обобщенной ранжировки на данном этапе выбрана стратегия развития – реконструкция существующих электросетевых объектов (реконструкция ПС «УПИ»).

Таблица 1.

Типы районов	Гипотетические стратегии развития
Строящиеся	1. Строительство новых электросетевых объектов. 2. Разукрупнение ВЛ. 3. Замена проводов на большие сечения.
Развивающиеся (и/или стабильно функционирующие)	1. Реконструкция существующих электросетевых объектов. 2. Строительство новых электросетевых объектов. 3. Малая (распределенная генерация).
Угасающие	1. Техническое перевооружение. 2. Применение технологий по увеличению энергоэффективности.

До последнего времени принятие решения в области электроэнергетики основывалось на критерии стоимости реализации проекта. В сегодняшних условиях в системе частных критериев, влияющих на выбор стратегии развития СЭС РГ, помимо капитальных вложений, следует учитывать: технические критерии (степень надежности электроснабжения, показатели качества электроэнергии, возможности энергосбережения и т.п.); градостроительные и архитектурные критерии (сохранение эстетики города, соблюдение благоприятных условий для быта и отдыха населения и т.п.); экологические критерии (охрана окружающей среды, экологическая безопасность и т.п.); обеспечение системы существующей инфраструктурой и ряд других факторов.

На основании выполненного анализа, в качестве критерия экономической эффективности выбраны дисконтированные затраты на реконструкцию подстанции, определяемые полученным в работе выражением:

$$Z_{\Sigma} = \left( B_1 + B_2 \Delta S_{ПС} + \sqrt{\frac{\Delta S_{ПС}}{\sigma}} (B_3 + B_4 F_{ЛВ}) + B_5 F_{ЛВ} \right) \times \\ \times \left( \sum_{t=2}^{T_{расч}} B_6 N_{ЛСН} \left( e^{\left( a_0 - \frac{a_1}{t} \right)} - e^{\left( a_0 - \frac{a_1}{t-1} \right)} \right) (1 + E_{н.н})^{1-t} \right) + \alpha \cdot \Delta W_{\Sigma} \quad (7)$$

где  $\Delta S_{ПС}$  – увеличение мощности ПС;  $\sigma$  – плотность электрической нагрузки;  $F_{ЛВ}$  – сечение токоведущих жил высокого напряжения;  $N_{ЛСН}$  – количество линий среднего напряжения, отходящих от ПС;  $a_0$ ,  $a_1$  – коэффициенты развития сети;  $E_{н.н}$  – норматив приведения;  $\alpha$  – стоимость потерь электроэнергии;  $\Delta W_{\Sigma}$  – суммарные потери электрической энергии;  $B_1 \dots B_6$  – стоимостные постоянные элементов подстанции. Первые два члена отражают затраты в подстанцию, следующие три – в кабельные линии 35 кВ, последний – в кабельную распределительную сеть 6 кВ.

За технический критерий (оценки эффективности энергосбережения) приняты потери электрической энергии, определяемые полученным выражением:

$$\Delta W_{\Sigma} = \sum_{t=1}^{T_{\text{расч}}} \left[ \frac{(A_1 n_{mp} + A_2 S_{ПС}) + (k_{pn}^t)^2 (A_3 n_{mp} + A_4 S_{ПС}) + \frac{(S_{ПС} k_{pn}^t)^2}{F_{ЛВ}} \left( A_5 + A_6 \sqrt{\frac{S_{ПС}}{\sigma}} \right) + A_7 \frac{(S_{ПС} k_{pn}^t)^2}{N_{ЛСН}^t \cdot e^{\left( a_0 - \frac{a_1}{t-2} \right)} \sqrt{\frac{S_{ПС}}{\sigma}}} \right], \quad (8)$$

где  $n_{mp}$  – число трансформаторов на ПС;  $S_{ПС}$  – мощность ПС;  $k_{pn}^t$  – коэффициент роста нагрузки по району в год  $t$ ;  $N_{ЛСН}^t$  – число линий среднего напряжения, построенных в год  $t$ ;  $A_1 \dots A_7$  – постоянные коэффициенты потерь электроэнергии. Первые два слагаемых отражают потери холостого хода в трансформаторах и нагрузочные потери, третье – в линиях, питающих ПС, последнее – потери электрической энергии в кабельной распределительной сети.

За критерий надежности СЭС выбран условный недоотпуск электроэнергии потребителям, определяемый полученным в работе выражением:

$$\Delta W_{НО} = \sum_{t=1}^{T_{\text{расч}}} Q_{нар} S_{ПС} k_{pn}^t C, \quad (9)$$

где  $Q_{нар}$  – вероятность нарушения электроснабжения потребителей, вследствие отсутствия напряжения хотя бы на одной из секций шин 6 кВ;  $C$  – коэффициент, учитывающий распределение нагрузки по секциям шин.

Градостроительный критерий отражен в критерии протяженности трасс кабельных линий 6 кВ:

$$L_{\Sigma ЛСН} = \sqrt{\frac{S_{ПС}}{\sigma}} N_{ЛСН} D, \quad (10)$$

где  $D$  – коэффициент, учитывающий расположение ПС на территории района.

В качестве показателя обеспеченности инфраструктурой введен новый критерий – критерий построения оптимальной структуры СЭС –  $\Delta\beta$ . Введение критерия  $\Delta\beta$  обосновано теорией построения систем-техноценозов. Согласно техноценологическому подходу, система будет оптимальна, если она, с одной стороны, характеризуется максимальными функциональными возможностями (в ней имеется такой набор объектов (элементов), которые, по своим функциональным показателям обеспечивают выполнение поставленных задач), а с другой стороны – рациональным распределением ресурсов (минимальными затратами на изготовление и всестороннее обеспечение (ремонт, техническое обслуживание, подготовку кадров и т.п.)). В работе критерий построения оптималь-

ной структуры СЭС предложено определять как разность по абсолютному значению идеального коэффициента рангового распределения, равного единице  $\beta_{ид} = 1$ , и коэффициента рангового распределения, определенного с учетом изменения инфраструктуры ТЦ вследствие внедрения или реконструкции объекта  $\beta^*$ :

$$\Delta\beta = |\beta_{ид} - \beta^*|. \quad (11)$$

Минимальное значение  $\Delta\beta$  приближает структуру техноценоза к «идеальной». Это дает возможность при выборе стратегии развития, например при строительстве новых электросетевых объектов или их реконструкции, изменяющих структуру системы электроснабжения района города, руководствоваться желаемой структурой СЭС РГ приближая ее к оптимальной.

Возможные погрешности, допущенные при аналитическом определении коэффициента роста нагрузки  $K_{pn}$ , могут привести к неоправданным затратам на развитие и функционирование СЭС района города. С целью исключения ошибок при расчете предлагается с помощью экспертов определить численные значения функции принадлежности (ФП) каждого возможного варианта  $k_n$  множеству  $K_{pn}$  ( $k_n \in K_{pn}$ ).

Для этого, знания  $m$  экспертов представляются в виде матрицы предпочтений  $R_m$ , каждый элемент которой есть значение функции принадлежности  $\mu_{R_m}(k_a, k_b)$ , выражающее степень предпочтительности коэффициента роста нагрузки  $k_a$  по сравнению с  $k_b$ , где  $k_a, k_b \in K_{pn}$ .

Строятся свертки  $P$  и  $Q$  отношений  $R_m$ :

$$P = \cap R_m(k_a, k_b) = \min\{\mu_{R_m}(k_a, k_b)\}; \quad Q = \sum \lambda_m R_m, \quad (12)$$

где  $\lambda_m$  – коэффициент компетентности  $m$ -го эксперта.

Определяются множества  $P^S$  и  $Q^S$ , с функциями принадлежности:

$$\mu^S(k_a, k_b) = \begin{cases} \mu(k_a, k_b) - \mu(k_b, k_a), & \text{если } \mu(k_a, k_b) > \mu(k_b, k_a) \\ 0, & \text{если } \mu(k_a, k_b) \leq \mu(k_b, k_a) \end{cases}. \quad (13)$$

Определяются множества  $K_P^{nd}$ ,  $K_Q^{nd}$ , несущие дополняющую друг друга информацию о недоминируемости вариантов коэффициента, с ФП:

$$\mu^{nd}(k_a) = 1 - \max\{\mu^S(k_b, k_a)\}. \quad (14)$$

Пересечение полученных множеств  $K_P^{nd}$  и  $K_Q^{nd}$  дает множество  $K^{nd} = K_P^{nd} \cap K_Q^{nd}$ , ФП элементов к которому определяется:

$$\mu^{nd}(k_a) = \min\{\mu_P^{nd}(k_a), \mu_Q^{nd}(k_b)\}. \quad (15)$$

Реализация предложенного математического аппарата позволила получить ряд численных значений функций принадлежности коэффициента роста электрической нагрузки исследуемой СЭС:

$$\mu_{K_{pn}}^{nd} = [0,1; 0,15; 0,3; 0,2; 0,27; 0,3; 0,45; 0,52; 0,32; 0,23].$$

В исследовании номенклатурно-параметрическая оптимизация осуществлена на основе теории нечетких множеств. Используется логическая схема, которой соответствует симметрия нечетких целей и ограничений, что позволяет их рассматривать как нечеткие множества в пространстве альтернатив. Таким образом, принятие решения в нечетких условиях интерпретируется как комплексное влияние нечеткой цели  $C$  и нечеткого ограничения  $G$  на выбор альтернатив и характеризуется пересечением  $C \cap G$ , которое и образует нечеткое множество решений  $D$ :

$$D = C \cap G. \quad (16)$$

При решении задач оптимизации в качестве нечетких целей обычно принимают критерии выбора решений (альтернатив). Для нескольких целей и ограничений нечеткое решение имеет вид:

$$D = c_1 \cap \dots \cap c_k \cap g_1 \cap \dots \cap g_j, \quad (17)$$

поэтому в условиях неопределенности, которые порождаются как неопределенностью целей, так и неполнотой знаний о внешних условиях, необходимо осуществить выбор решения  $d$  из возможного множества решений  $D$ .

Нечеткие множества целей  $C \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$  (в исследовании это частные критерии), являясь функциями нечеткого множества коэффициента роста нагрузки –  $K_{pn} \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  и нечеткого множества альтернатив  $A \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$  (в исследовании это варианты номенклатурных параметров объектов СЭС, таблица 2), образуют нечеткие отношения  $R\{K_{pn} \times C\}$  для каждого  $a_i \in A$ . Нечеткие отношения  $R\{K_{pn} \times C\}$  задаются с помощью матриц инцидентий. В результате получают  $k$  матриц размером  $n \times i$ , элемент которых  $\mu_{Rni}^k$  интерпретируется как степень принадлежности пары  $(k_n, a_i)$  нечеткому отношению  $R_k$ .

Таблица 2.

Стратегии развития	Номенклатурные параметры объектов-особей СЭС (матрицы вариантов решений)
Реконструкция существующих электросетевых объектов	Варианты номинальных мощностей трансформаторов
Строительство новых электросетевых объектов (подстанций)	Варианты типов и мощностей трансформаторов
Малая (распределенная генерация)	Варианты типов энергетических установок (ГТУ, ПГУ, ВЭУ), их параметры



Значения функций принадлежности частных критериев принятия решения определяются путем нормирования. Поскольку выбранные в работе критерии принятия решения должны быть минимизируемы, то значения ФП определяются выражением:

$$\mu_{R_k} = \frac{c_{\max} - c_i}{c_{\max} - c_{\min}}. \quad (18)$$

Функция принадлежности нечетких целей  $\mu_{C_k}$  определяется как композиция нечеткого множества  $K_{pn}$  и нечеткого отношения  $R_k$ :

$$\mu_{C_k} = \mu_{K_{pn} \circ R_k} = \max \min \{ \mu_{K_{pn}}^{nd}, \mu_{R_k} \}. \quad (19)$$

Выбор номенклатурных параметров объектов СЭС района города осуществляется из полученных матриц по выражению:

$$\mu_D(a_i) = \max \min \{ \mu_{C_k} \}. \quad (20)$$

В соответствии с таблицей 2 на третьем этапе для выбранной стратегии развития СЭС района города (реконструкция существующих электросетевых объектов – ПС «УПИ») альтернативами (номенклатурными параметрами объектов-особей СЭС) являются варианты номинальных мощностей трансформаторов. Поскольку на ПС «УПИ» установлены два трансформатора мощностью по 16 МВА, то в работе в качестве альтернатив рассмотрены следующие возможные варианты ее реконструкции:

- 1) замена двух установленных трансформаторов на трансформаторы большей мощности ( $2 \times 25$  МВА);
- 2) замена одного из двух трансформаторов на большую мощность ( $1 \times 25$  МВА,  $1 \times 16$  МВА);
- 3) установка третьего трансформатора, мощностью 16 МВА ( $3 \times 16$ );
- 4) установка третьего трансформатора, мощностью 25 МВА ( $1 \times 25$  МВА,  $2 \times 16$  МВА);
- 5) установка третьего трансформатора, мощностью 25 МВА с заменой одного из двух установленных на большую мощность ( $2 \times 25$  МВА,  $1 \times 16$  МВА).

Выбор наилучшего варианта осуществлен по полученным аналитическим выражениям критериев: дисконтированных затрат (7), потерь электрической энергии (8), недоотпуска электроэнергии потребителям (9), протяженности трасс кабельных линий 6 кВ (10) и построения оптимальной структуры (11) с учетом неопределенного фактора – коэффициента роста нагрузки.

В таблице 3 представлены результаты численного эксперимента расчета значений функций принадлежности нечетких целей согласно выражению (19).

Таблица 3.

Нечеткие цели	Функции принадлежности нечетких целей				
	1 вар	2 вар	3 вар	4 вар	5 вар
Дисконтированные затраты – $\mu_{3\Sigma}$	0,2	0,52	0,52	0,52	0
Потери электроэнергии – $\mu_{\Delta W_{\Sigma}}$	0,52	0,52	0,52	0,363	0
Недоотпуск электроэнергии – $\mu_{\Delta W_{HO}}$	0	0,488	0,52	0,52	0,357
Протяженность трасс кабельных линий – $\mu_{L_{\Sigma, LCH}}$	0,52	0,52	0,52	0,35	0
Построение оптимальной структуры – $\mu_{\Delta\beta}$	0,52	0,52	0,52	0,403	0

Выбор варианта реконструкции ПС «УПИ» осуществляется из пяти полученных матриц-строк согласно выражению (20):

$$\mu_D(a_i) = \max \min \{ \mu_{3\Sigma}, \mu_{\Delta W_{\Sigma}}, \mu_{\Delta W_{HO}}, \mu_{L_{\Sigma, LCH}}, \mu_{\Delta\beta} \} = \\ = \max \{ 0; 0,488; 0,52; 0,35; 0 \} = 0,52$$

что соответствует выбору третьего варианта, т.е. установке на ПС «УПИ» третьего трансформатора, мощностью 16 МВА.

**В четвертой главе** «Методика принятия решения по развитию СЭС и ее программная реализация» разработаны методика принятия решения по развитию СЭС района города в условиях неопределенности, алгоритм и программная реализация методики.

На основании материала представленного во второй и третьей главах автором разработана новая методика принятия решения по развитию СЭС района города, функционально-логическая схема которой представлена на рисунке 3.



Рисунок 3 – Функционально-логическая схема методики решения многокритериальных задач оптимизации СЭС РГ в условиях неопределенности.

Предложенная методика отличается от существующих следующим:

- применением техноценологического подхода к исследованию СЭС, позволяющего впервые ввести в систему частных критериев принятия решения – критерий построения оптимальной структуры СЭС района города;
- возможностью проведения как структурной, так и номенклатурно-параметрической оптимизации СЭС РГ;
- интеграцией теорий техноценоза и нечетких множеств, позволяющей снизить неопределенность исходных данных в решении многокритериальных задач оптимизации СЭС района города.

Для реализации этой методики разработан программный комплекс («ПК ЭСМОС»), состоящий из следующих модулей: модуль Main является главным модулем, предназначен для взаимодействия других модулей, подключения к базе данных, предоставления главного меню; модуль Matrix реализует основной набор операций с матрицами; модуль DBase реализует основной набор операций для работы с базой данных; модуль Kompetent реализует алгоритм получения коэффициентов компетентности экспертов и формирования экспертной группы; модули ParnyhSr, Rang, NepOcenka реализуют соответственно алгоритмы парных сравнений, обобщенного ранжирования, непосредственного оценивания для определения стратегии развития СЭС; модули Discontir, Energy, NeOtpusk, DiLiniy, Structur реализуют соответственно алгоритмы расчета дисконтированных затрат, потерь электрической энергии, недоотпуска электроэнергии потребителям, протяженности трасс кабельных линий, построения оптимальной структуры СЭС; модуль SelStrateg реализует интерфейс пользователя для определения оптимальных параметров стратегии.

Выполнено тестирование разработанного ПК для выбора стратегии развития и параметров исследуемой системы в программной среде MathCad. Анализ результатов, полученных при тестировании «ПК ЭСМОС» с помощью MathCad позволил сделать вывод о том, что разработанный программный комплекс работает адекватно, имеет вычислительную устойчивость на недопустимых наборах данных, выдавая при этом соответствующие сообщения и предупреждения пользователю.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Анализ научно-технической литературы по решению оптимизационных задач в электроэнергетике позволил обосновать, что вопросы методики принятия решения по развитию СЭС на основе многокритериальной модели целесообразно разрабатывать путем интеграции техноценологического подхода с теорией нечетких множеств.

2. На основании несоответствия генеральной совокупности данных о потребителях электроэнергии и данных по установленному электротехническому оборудованию нормальному закону распределения и значимой взаимосвязи этих данных, обоснована принадлежность СЭС района «УПИ» г. Екатеринбурга и потребителей электроэнергии этого района к системам техноценологического типа.

С помощью  $H$ -распределений определен диапазон прогнозируемого коэффициента роста/спада нагрузки  $K_{рн}$ . Анализ темпов его изменения позволил классифицировать исследуемую СЭС района города к развивающемуся (стабильно функционирующему) типу.

3. Сформулирована и обоснована система частных критериев принятия решения в выборе варианта развития систем электроснабжения районов города. В качестве критерия экономической эффективности выбраны дисконтированные затраты; критерия эффективности энергосбережения – потери электроэнергии; надежности электроснабжения – недоотпуск электроэнергии потребителям; градостроительного критерия – протяженность трасс кабельных линий. Обосновано введение в систему частных критериев принятия решения нового критерия построения оптимальной структуры.

Предложены стратегии развития системы электроснабжения в зависимости от типов районов СЭС.

Результатом выбора стратегии развития СЭС района «УПИ» г. Екатеринбурга является реконструкция ПС «УПИ».

4. Разработаны математические модели частных критериев принятия решения, как функции неопределенного внешнего фактора – коэффициента роста нагрузки и альтернативы.

5. В процессе проведения номенклатурно-параметрической оптимизации СЭС района города с применением теории нечетких множеств, предложено использовать:

- в качестве альтернатив сравнения  $a_i$  – количество и мощность трансформаторов на подстанции;
- в качестве нечетких целей – систему частных критериев;
- в качестве неопределенного внешнего фактора – коэффициент роста нагрузки  $K_{рн}$ .

Результатом выбора номенклатурных параметров реконструируемой ПС «УПИ», является решение установки на подстанции третьего трансформатора, мощностью 16 МВА.

6. Предложена новая методика принятия решения по развитию систем электроснабжения районов города, основанная на интеграции техноценологи-

ческого подхода и теории нечетких множеств, позволяющая учесть ряд неопределенных внешних факторов и сочетать преимущества обоих подходов в решении сложных задач анализа и управления. Функционально-логическая схема методики включает в себя три этапа: информационно-аналитический, структурной оптимизации, номенклатурно-параметрической оптимизации.

7. Предложенная методика реализована в программном комплексе «ПК ЭСМОС» и его компонентах, которые зарегистрированы в УФАП ГОУ ОГУ св-во № 437, 2009, г. Оренбург и в Федеральном институте промышленной собственности (Роспатент) св-во № 2009615732, 2009, г. Москва.

### **Опубликованные работы по теме диссертации Статьи в изданиях рекомендованных ВАК РФ**

1. Бердин, А. С. Оптимизация системы электроснабжения в условиях неопределенности / А. С. Бердин, С. Е. Кокин, **Л. А. Семенова** // Промышленная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 29-35.

2. Бердин, А. С. Интеграция техноценологического подхода и теории нечетких множеств в задачах оптимизации систем электроснабжения / А. С. Бердин, **Л. А. Семенова** // Известия вузов. Проблемы энергетике. – 2010. – № 3-4. – С. 151-156.

### **Статьи, тезисы докладов в других научных и научно-практических изданиях**

3. Семенов, А. М. Модель адаптивной системы нейро-нечеткого вывода для решения задач прогнозирования / А. М. Семенов, **Л. А. Семенова** // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике : материалы V Всерос. науч.-практ. конф. (с международ. участием), Оренбург, 23-24 нояб. 2006 г. – Оренбург : ОГУ, 2006. – С. 44-48.

4. Бердин, А. С. Возможность применения техноценологического подхода при исследовании сложных технических систем / А. С. Бердин, **Л. А. Семенова** // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : тр. Всерос. науч.-техн. конф., Оренбург, 8-12 октяб. 2007 г. – Оренбург : ОГУ, 2007. – С. 3-8.

5. Вашляев, М. Э. Паспортизация объектов энергопотребления (жилые дома, объекты социальной сферы) / М. Э. Вашляев, **Л. А. Семенова** // Научные труды XIV отчетной конференции молодых ученых УГТУ – УПИ : сб. ст. / УГТУ – УПИ. – Екатеринбург, 2008. – Ч. 3. – С. 28-29.

6. Бердин, А. С. Техноценологический анализ и теория нечетких множеств при формировании моделей развития систем электроснабжения / А. С. Бердин, С. Е. Кокин, **Л. А. Семенова** // Энергосистема: управление, конкуренция, образование : сб. докл. III Международ. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 14-16 октяб. 2008 г. – Екатеринбург : УГТУ – УПИ, 2008. – Т.2. – С. 10-13.

7. **Семенова, Л. А.** Алгоритм выбора варианта развития системы электроснабжения // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. (с международ. участием), Оренбург, 27-28 нояб. 2008 г. – Оренбург : ОГУ, 2008. – С. 48-49.

8. **Семенова, Л. А.** Методика определения характеристического показателя *H*-распределений по параметру электропотребления для СЭС // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий : сб. науч. тр. II Всерос. науч.-техн. конф., Уфа, 19-20 марта 2009 г. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2009. – Т.1. – С. 174-179.

9. Бердин, А. С. Выбор частных критериев на основе анализа стратегий развития и типов районов СЭС / А. С. Бердин, **Л. А. Семенова** // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., Тольятти, 12-15 мая 2009 г. – Тольятти : ТГУ, 2009. – Ч. 2. – С. 98-101.

10. Бердин, А. С. Ценологический подход к обоснованию частного критерия в задачах оптимизации систем электроснабжения / А. С. Бердин, **Л. А. Семенова** // Повышение эффективности электрического хозяйства потребителей в условиях ресурсных ограничений : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с международ. участием., Москва, 16-20 нояб. 2009 г. – М. : Технетика, 2009. Т. 1. – С. 224-226.

11. **Семенова, Л. А.** Аналитические модели частных критериев и алгоритм выбора параметров стратегии развития СЭС в условиях неопределенности // Современные информационные технологии в науке, образовании и практике : материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. (с международ. участием), Оренбург, 25-27 нояб. 2009 г. – Оренбург : ОГУ, 2009. – С. 50-53.

12. **Семенова, Л. А.** Методика выбора варианта развития системы электроснабжения // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : сб. материалов Всерос. студ. олимпиады 16-19 ноября 2009 г., научн.-практ. конф. и выставки студ., аспирантов и молодых ученых, Екатеринбург, 14-18 декаб. 2009 г. – Екатеринбург : УГТУ – УПИ, 2009. – С. 280-282.

### **Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

13. Св-во о регистрации программного средства для ЭВМ «Экспертное оценивание» / Семенов А. М., Багров, В. В., **Семенова Л. А.**; УФАП. – № 437 ; опубл. 04.03.09.

14. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ «ПК ЭС-МОС» / Семенов А. М., **Семенова Л. А.** ; РОСПАТЕНТ. – № 2009616955 ; заявл. 15.10.09 ; опубл. 15.12.09.

---

Подписано в печать 17.05.2010

Формат 60×84 1/16

Бумага писчая

Плоская печать

Тираж 120 экз.

Заказ

---

Ризография НИЧ УГТУ-УПИ  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19